

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tanah Lempung

Tanah lempung merupakan partikel mineral yang berukuran lebih kecil dari 0,002 mm. Partikel-partikel ini merupakan sumber utama dari kohesi di dalam tanah yang kohesif (Bowles,1989).

Tanah lempung merupakan tanah yang berukuran mikroskopis sampai dengan sub-mikroskopis yang berasal dari pelapukan unsur-unsur kimiawi penyusun batuan. Tanah lempung sangat keras dalam keadaan kering dan bersifat plastis pada kadar air sedang. Pada kadar air lebih tinggi, lempung bersifat lengket (kohesif) dan sangat lunak (Das,2006).

Sifat-sifat yang dimiliki tanah lempung adalah sebagai berikut (Hardiyatmo,1992):

1. Ukuran butir halus, kurang dari 0,002 mm
2. Permeabilitas rendah
3. Kenaikan air kapiler tinggi
4. Bersifat sangat kohesif
5. Kadar kembang susut yang tinggi
6. Proses konsolidasi lambat

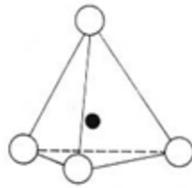
Tanah butiran halus khususnya tanah lempung akan banyak dipengaruhi air. Sifat pengembangan tanah lempung yang dipadatkan akan lebih besar pada lempung yang dipadatkan pada kering optimum daripada yang dipadatkan pada basah optimum. Lempung yang dipadatkan pada kering optimum relatif kekurangan air, oleh karena itu lempung ini mempunyai kecenderungan yang lebih besar untuk menyerap air, dan hasilnya adalah sifat yang mudah mengembang tersebut (Hardiyatmo,1992).

2.2 Lempung dan Mineral Penyusunnya

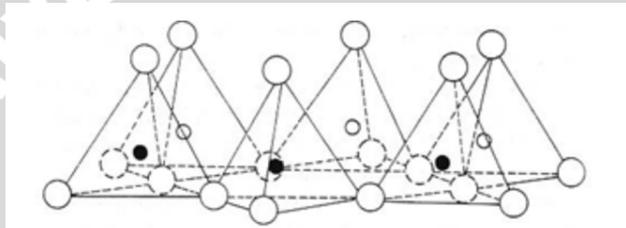
Mineral lempung merupakan senyawa aluminium silikat yang kompleks. Mineral ini terdiri dari dua lempung kristal pembentuk kristal dasar, yaitu silika tetrahedra dan aluminium oktahedra. (Das, 1995).

2.2.1 Struktur Mineral Penyusun Lempung

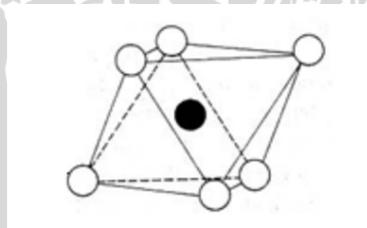
Menurut (Das,1995), satuan struktur dasar dari mineral lempung terdiri dari silika tetrahedron dan aluminium oktahedron. Satuan-satuan dasar tersebut bersatu membentuk struktur lembaran seperti yang digambarkan pada Gambar 2.1 sampai dengan Gambar 2.4 berikut ini. Jenis-jenis mineral lempung tergantung dari komposisi susunan satuan struktur dasar atau tumpuan lembaran serta macam ikatan antara masing-masing lembaran.



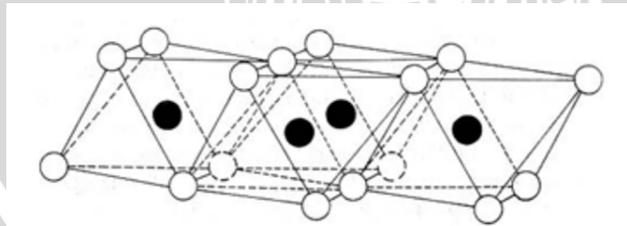
Gambar 2.1 *Single Silika Tetrahedral*



Gambar 2.2 *Isometric Silika Sheet*



Gambar 2.3 *Single Aluminium Oktahedron*

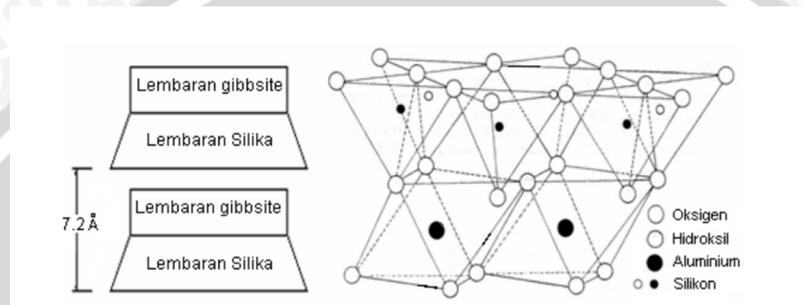


Gambar 2.4 *Isometric Oktahedral Sheet*
Sumber : Das (1995)

Jika ditinjau dari mineraloginya, lempung terdiri dari berbagai mineral penyusun, antara lain mineral lempung (*kaolinite*, *montmorillonite* dan *illitegroup*) dan mineral-mineral lain yang mempunyai ukuran sesuai dengan batasan yang ada (*mika group*, *serpentine group*).

2.2.1.1 Kaolinite

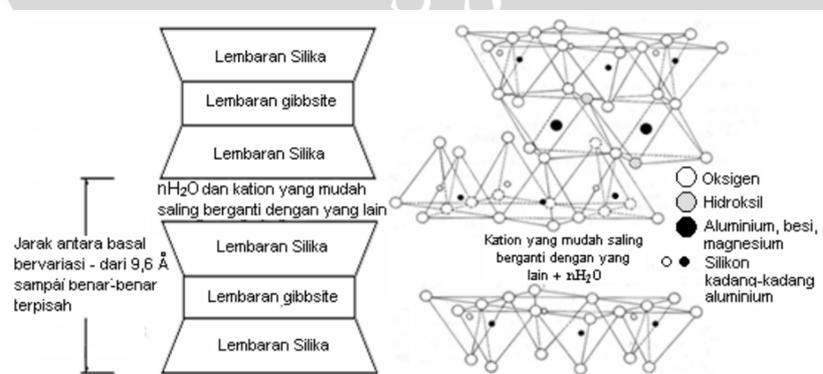
Kaolinite disebut sebagai mineral lempung satu banding satu (1:1). Bagian dasar dari struktur ini adalah lembaran tunggal silika tetrahedral yang digabung dengan satu lembaran alumina oktahedran (*gibbsite*) membentuk satu unit dasar dengan tebal kira-kira $7,2 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) seperti yang terlihat pada Gambar 2.5. Hubungan antar unit dasar ditentukan oleh ikatan hidrogen dan gaya bervalensi sekunder. Mineral *kaolinite* berwujud seperti lempengan-lempengan tipis, masing-masing dengan diameter 1000 \AA sampai 20000 \AA dan ketebalan dari 100 \AA sampai 1000 \AA dengan luasan spesifik per unit massa $\pm 15 \text{ m}^2/\text{gr}$.



Gambar 2.5 Struktur *Kaolinite*
Sumber: Das (1995)

2.2.1.2 Montmorillonite

Montmorillonite disebut juga mineral dua banding satu (2:1) karena satuan susunan kristalnya terbentuk dari susunan dua lempeng silika tetrahedral mengapit satu lempeng alumina oktahedral ditengahnya. Struktur kisinya tersusun atas satu lempeng Al_2O_3 diantara dua lempeng SiO_2 . Karena struktur inilah *montmorillonite* dapat mengembang dan mengkerut menurut sumbu C dan mempunyai daya adsorpsi air dan kation lebih tinggi. Tebal satuan unit adalah $9,6 \text{ \AA}$ ($0,96 \text{ \mu m}$), seperti ditunjukkan Gambar 2.6 dibawah ini sebagaimana dikutip Das (1995).

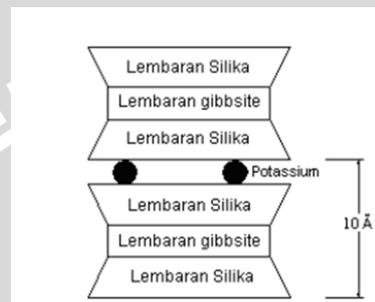


Gambar 2.6 Struktur *Montmorillonite*
Sumber: Das (1995)

2.2.1.3 Illite

Mineral *illite* mempunyai hubungan dengan mika biasa, sehingga dinamakan pula hidrat-mika. *Illite* memiliki formasi struktur satuan kristal, tebal dan komposisi yang hampir sama dengan *montmorillonite*. Perbedaannya ada pada :

- Pengikatan antar unit kristal terdapat pada kalium (K) yang berfungsi sebagai penyeimbang muatan, sekaligus sebagai pengikat
- Terdapat $\pm 20\%$ pergantian silikon (Si) oleh aluminium (Al) pada lempeng tetrahedral.
- Struktur mineralnya tidak mengembang sebagaimana *montmorillonite*

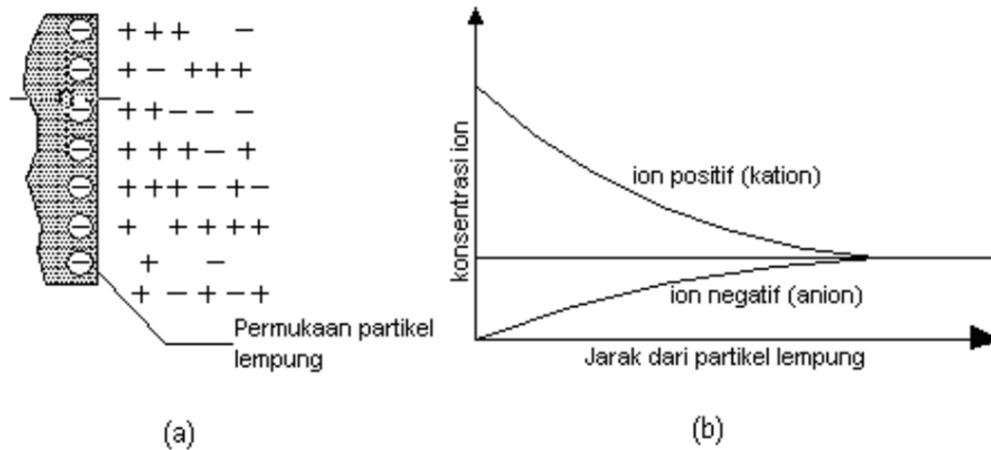


Gambar 2.7 Struktur *Illite*
Sumber: Das(1995)

2.3 Fenomena Tanah Lempung Ekspansif

Permukaan mineral lempung tanah biasanya mengandung muatan elektronegatif yang memungkinkan terjadinya reaksi pertukaran kation. Muatan ini merupakan hasil dari satu atau lebih dari reaksi yang berbeda.

Lempung dalam suspensi dapat menarik kation-kation, ion-ion positif tersebut tidak teragih secara seragam dalam seluruh media dispersi, mereka ditahan pada atau dekat permukaan lempung sebagian kation tersebut bebas untuk dipertukarkan dengan kation lain. Dengan demikian muatan negatif pada permukaan lempung ditutupi oleh sekumpulan ekuivalen dari ion lawan bermuatan positif dengan kerapatan terbesar dekat permukaan dan semakin berkurang kerapatannya dengan bertambahnya jarak dari permukaan partikel. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.8 dibawah. Das (1995) berpendapat bahwa tingkat kerapatan ion lawan dilapisan kedua merupakan fungsi jarak, semakin jauh jaraknya dari tepi permukaan partikel lempung semakin kecil tingkat kerapatan ion.



Gambar 2.8 Lapisan Ganda Terdifusi Partikel Lempung
 Sumber: Das (1995)

Muatan negatif yang lebih besar dijumpai pada partikel-partikel yang mempunyai luasan spesifik yang lebih besar. Pada Tabel 2.1 berikut, rata-rata kerapatan muatan dikedua sisi permukaan partikel diberikan daftar rata-rata kerapatan muatan negatif pada kedua permukaan pada mineral-mineral lempung sebagaimana dikutip Das (1995).

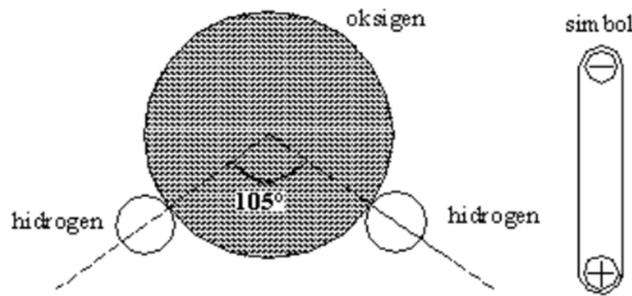
Tabel 2.1 Rata-Rata Kerapatan Muatan di Kedua Sisi Permukaan Partikel

Mineral Lempung	Kerapatan muatan dikedua sisi permukaan partikel (A^{02} /muatan elektron)
<i>Kaolinite</i>	25
Mika lempung dan <i>Chlorite</i>	50
<i>Montmorillonite</i>	100
<i>Vermicullite</i>	75

Sumber : Das(1995)

Muatan negatif pada permukaan partikel lempung beserta kumpulan ion-ion lawan yang bermuatan positif disebut lapisan rangkap listrik atau *diffuse double layer*. Lapisan pertama dari lapisan rangkap tersebut terbentuk dari muatan dari permukaan lempung (berupa muatan titik yang terlokalisasi) tetapi dianggap teragih secara merata pada permukaan lempung. Lapisan kedua berada dalam lapisan cairan yang berdekatan dengan permukaan lempung.

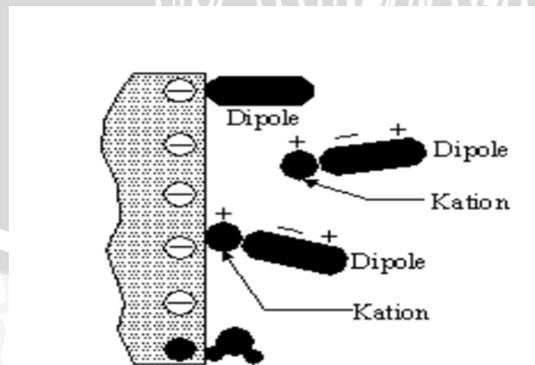
Molekul air merupakan molekul dipolar karena atom hidrogen tidak tersusun simetris disekitar atom oksigen melainkan membentuk sudut ikatan 105° , akibatnya molekul-molekul air berperilaku seperti batang-batang kecil yang mempunyai muatan positif di satu sisi dan muatan negatif disisi lainnya. Sifat dipolar air terlihat pada Gambar 2.9 berikut.



Gambar 2.9 Sifat Dipolar Molekul Air
Sumber: Das (1995)

Interaksi antara molekul-molekul air dengan partikel lempung dapat melalui tiga proses. Pertama, kutub positif dipolar air akan saling tarik menarik dengan muatan negatif permukaan partikel lempung. Kedua, molekul air diikat oleh partikel lempung melalui ikatan hidrogen (hidrogen air ditarik oksigen atau hidroksil lain yang ada pada permukaan partikel lempung). Ketiga, penarikan molekul air oleh muatan negatif permukaan lempung secara berantai melalui kation yang mengapung dalam larutan air. Faktor paling dominan adalah proses ikatan hidrogen (proses kedua).

Jumlah molekul air yang berinteraksi dengan permukaan lempung akan sangat dipengaruhi oleh jenis mineral yang ada, yaitu pada nilai luasan permukaan spesifiknya (*specific surface*). Luas permukaan lempung merupakan faktor utama yang mempengaruhi besarnya molekul air yang ditarik untuk membentuk lapisan listrik rangkap (*diffuse double layer*). Fenomena ini mengidentifikasi kemampuan mineral lempung menarik molekul air atau menunjukkan kapasitas perilaku plastis tanah lempung seperti terlihat pada Gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Interaksi Molekul Air dengan Partikel Lempung
Sumber: Das (1995)

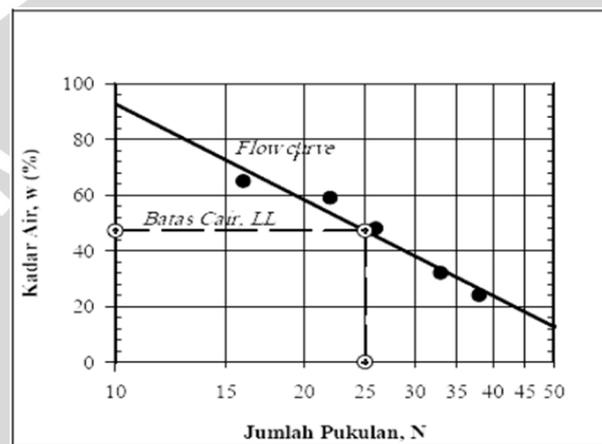
2.4 Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif

Hasil uji sejumlah indeks dasar tanah dapat digunakan untuk evaluasi berpotensi ekspansif atau tidak pada suatu contoh tanah. Uji indeks dasar adalah uji batas-batas *Atterberg*, *linear shrinkage test* (uji susut linier), dan uji potensi mengembang (*swelling*).

2.4.1 *Atterberg Limit*

2.4.1.1 Batas Cair (*Liquid Limit*)

Batas cair adalah kadar air tanah pada kondisi batas antara keadaan cair dan keadaan plastis.



Gambar 2.11 Kurva Pada Penentuan Batas Cair Tanah

2.4.1.2 Batas Plastis (*Plastic Limit*)

Secara umum semakin besar plastisitas tanah, yaitu semakin besar rentang kadar air daerah plastis maka tanah tersebut akan semakin berkurang kekuatan dan mempunyai kembang susut yang semakin besar. Indeks plastisitas adalah selisih batas cair dan batas plastis (Interval kadar air pada kondisi tanah masih bersifat plastis), karena itu menunjukkan sifat keplastisan tanah.

Besaran indeks plastis dapat digunakan sebagai indikasi awal *swelling* pada tanah lempung. Potensi mengembang tanah ekspansif sangat erat hubungannya dengan indeks plastisitas seperti terlihat dalam Tabel 2.2 berikut :

Tabel 2.2 Hubungan Potensial Mengembang dengan Indeks Plastisitas

Potensi Mengembang	Indeks Plastisitas
Rendah	0-15
Sedang	10-35
Tinggi	20 - 55
Sangat Tinggi	35 <

Sumber: Chen (1975)

2.4.1.3 Batas Susut (*Shrinkage Limit*)

Tanah akan mengalami penyusutan bila kadar air secara perlahan-lahan berkurang dari dalam tanah. Dengan berkurangnya air terus menerus, maka tanah akan mencapai suatu tingkat keseimbangan, dimana penambahan kehilangan air tidak akan menyebabkan perubahan volume tanah.

Kandungan mineral montmorillonite mempengaruhi nilai batas konsistensi. Semakin besar kandungan mineral montmorillonite semakin besar batas cair dan indeks plastisitas serta semakin kecil nilai batas susut dan batas plastisnya (Hardiyatmo, 2006).

Angka-angka batasan Atterberg untuk bermacam-macam mineral lempung menurut Mitchell (1976) dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Harga-harga Batasan Atterberg untuk Mineral Lempung

Mineral	Batas Cair	Batas Plastis	Batas Susut
Monmorillonite	100 - 900	50 - 100	8,5 - 15
Montronite	37 - 72	19 - 72	-
Illite	60 - 120	35 - 60	15 - 17
Kaolinite	30 - 110	25 - 40	25 - 29
Halloysite	50 - 70	47 - 60	-
Terhidrasi	35 - 55	30 - 45	-
Holloysite	160 - 230	100 - 120	-
Attapulгите	44 - 47	36 - 40	-
Chlorite	200 - 250	130 - 140	-
Allophane			

Sumber : Mitchell (1976)

Acuan mengenai hubungan derajat mengembang tanah lempung dengan nilai persentase susut linier dan persentase batas susut Atterberg, seperti yang tercantum dalam Tabel 2.4 berikut :

Tabel 2.4 Klasifikasi Potensi Mengembang Didasarkan pada Batas Atterberg Limit

Batas Susut Atterberg (%)	Susut Linier (%)	Derajat Mengembang
< 10	> 8	Kritis
10 – 12	5 – 8	Sedang
> 12	0 – 8	Tidak Kritis

Sumber: Chen (1975)

2.4.2 Activity Method

Parameter menurut Skemton 1953 yang disebut aktivitas dalam rumus sebagai berikut :

$$\text{Activity (A)} = \frac{PI}{C - 10} \quad (2-1)$$

Keterangan ; PI = Indeks Plastisitas

C = persentase lempung lolos saringan 0.002 mm

Dari rumus tersebut kategori tanah terbagi dalam tiga golongan, yaitu :

- $A < 0,75$ (tidak aktif)
- $0,75 < A < 1,25$ (normal)
- $A > 1,25$ (aktif)

Besaran aktifitas menurut Seed (1962) berdasarkan jenis mineral, seperti yang terlihat dalam Tabel 2.5 dibawah ini.

Tabel 2.5 Hubungan Aktifitas dengan Mineral

Mineral	Aktivitas
Kaolinite	0,33 – 0,46
Illite	0,99
Monmorillonite (Ca)	1,5
Monmorillonite (Na)	7,2

Sumber: Seed (1962)

2.5 Distribusi Ukuran Butir Tanah

Sifat-sifat tanah sangat tergantung pada ukuran butirannya. Besarnya butiran dijadikan dasar untuk pemberian nama dan klasifikasi tanah. Oleh karena analisis ukuran butiran merupakan penentuan persentase berat butiran pada satu unit saringan dengan ukuran

diameter lubang tertentu. Pada umumnya pengukuran analisis ukuran butiran dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu analisis ayakan (*sieve analysis*) dan analisis pengendapan (*hydrometer analysis*).

Analisis ayakan (*sieve analysis*) digunakan untuk menyaring tanah berbutir kasar yang tertahan saringan no. 200 (lebih besar dari 0,075 mm). Kemudian analisis pengendapan (*hydrometer analysis*) digunakan untuk distribusi ukuran butir tanah berbutir halus yang lolos saringan no. 200 (lebih kecil dari 0,075 mm) dengan cara sedimentasi. Metode ini didasarkan pada hukum Stokes yang berkenaan dengan kecepatan mengendap butiran pada larutan suspensi. Biasanya butiran yang besar akan mengendap terlebih dahulu dan yang lebih kecil akan lebih lambat. Dari pengujian ini akan diketahui prosentase masing-masing range ukuran butir (Hardiyatmo, 2006).

2.6 Klasifikasi Tanah berdasarkan *Unified System*

Sistem klasifikasi tanah ini yang paling banyak dipakai untuk pekerjaan Teknik Pondasi seperti untuk bendungan, bangunan dan konstruksi yang sejenis. Sistem ini biasa digunakan untuk desain lapangan udara dan untuk spesifikasi pekerjaan tanah untuk jalan.

Klasifikasi berdasarkan *Unified System* (Das, 1988), tanah dikelompokkan menjadi :

1. Tanah butir kasar (*coarse-grained-soil*) yaitu tanah kerikil dan pasir dimana kurang dari 50% berat total contoh tanah lolos ayakan no.200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal G atau S. G adalah untuk kerikil (*gravel*) atau tanah berkerikil, dan S adalah untuk pasir (*sand*) atau tanah berpasir.
2. Tanah berbutir halus (*fine-grained-soil*) yaitu tanah dimana lebih dari 50 % berat total contoh tanah lolos ayakan no.200. Simbol dari kelompok ini dimulai dengan huruf awal M untuk lanau (*silt*) anorganik, C untuk lempung (*clay*) anorganik, dan O untuk lanau organik dan lempung organik. Simbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), muck, dan tanah-tanah lain dengan kadar organik yang tinggi.

Selanjutnya tanah diklasifikasikan dalam sejumlah kelompok dan sub kelompok seperti terlihat dalam Tabel 2.6 berikut ini :

Tabel 2.6 Simbol Klasifikasi tanah berdasarkan *Unified System*

Jenis Tanah	Simbol	Sub Kelompok	Simbol
		Gradasi baik	W
Kerikil	G	Gradasi Buruk	P
Pasir	S	Berlanau	M
		Berlempung	C
Lanau	M		
Lempung	C	LL < 50%	L
Organik	O	LL > 50%	H
Gambut	PT		

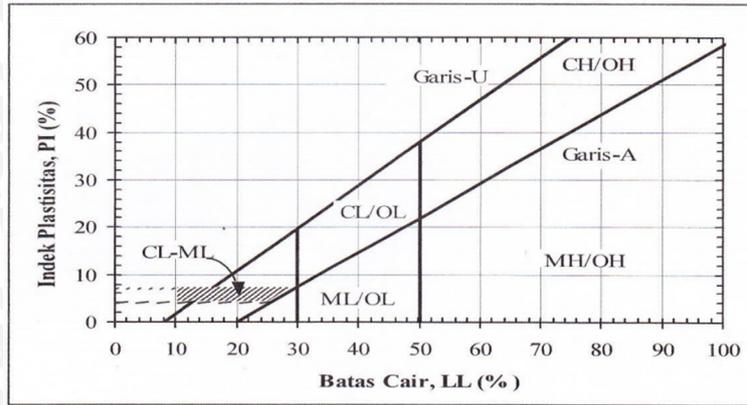
Sumber: Bowles (1989)

2.7 Indeks Plastisitas (PI)

Umumnya tanah berbutir halus secara alamiah berada pada dalam kondisi plastis. Batas atas dan bawah dari rentang kadar air dimana tanah masih bersifat plastis berturut-turut disebut batas cair (LL) dan batas plastis (PL). Rentang kadar air itu sendiri didefinisikan sebagai indeks plastisitas (PI), seperti pada Persamaan (2-2) yaitu :

$$PI = LL - PL \quad (2-2)$$

Menurut *Unified Soil Classification System* (USCS) salah satu contoh tanah butir halus adalah tanah ini dibagi menjadi dua kelompok yaitu tanah butir halus yang sifat plastisnya rendah (LL < 50%) dan sifat plastisnya tinggi (LL > 50%). Kemudian, simbol tanah butir halus ditetapkan dengan menggunakan plastisitas *Casagrande* didapat CH, MH, OH, CL, ML dan OL. Dengan data LL dan PI diplotkan dalam diagram, lalu dilihat secara analisis LL < 50% atau LL > 50% selanjutnya dihitung PI batas = 0,73 (LL-20), jika PI > PI batas berarti di atas garis A dan sebaliknya. Selain garis A, terdapat pula garis U yang merupakan batas dari hubungan antara indek plastisitas dan batas cair untuk suatu tanah. Garis U mengikuti persamaan garis lurus PI = 0,9 (LL-8) seperti Gambar 2.12 berikut.



Gambar 2.12 Grafik Plastisitas untuk Klasifikasi Tanah USCS
Sumber: Sukirman (1999)

2.8 Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah pada prinsipnya adalah untuk perbaikan mutu tanah yang kurang baik. Menurut Bowles (1986), stabilisasi dapat dilakukan melalui beberapa tindakan sebagai berikut:

1. Menambah kerapatan tanah
2. Menambah material yang tidak aktif sehingga mempertinggi kohesi atau tahanan geser
3. Menambah material untuk menyebabkan perubahan-peubahan kimiawi dan fisik dari material tanah
4. Menurunkan muka air tanah
5. Mengganti tanah-tanah yang buruk

Sementara itu, menurut Ingles dan Metcalf (1972), stabilisasi dapat dilakukan dengan beberapa metode, yaitu:

1. Cara mekanis

Stabilisasi mekanis biasanya dilakukan dengan menggunakan pralatan mekanis seperti mesin gilas, penumbuk, peledak, tekanan statis, dan sebagainya. Tujuan stabilisasi ini adalah untuk mendapatkan tanah yang berdaya dukung baik dengan cara mengurangi volume pori sehingga menghasilkan kepadatan tanah yang maksimum. Metode ini biasanya digunakan pada tanah yang berbutir kasar dengan fraksi tanah yang lolos saringan nomor 200 ASTM paling banyak 25%.

2. Cara fisik

Perbaikan tanah dengan cara fisik ini yaitu dengan memanfaatkan perubahan-perubahan fisik yang terjadi seperti hidrasi, absorpsi/penyerapan air, pemanasan, pendinginan, dan menggunakan arus listrik.

3. Cara kimiawi

Perbaikan tanah dengan cara kimiawi adalah penambahan bahan stabilisasi yang dapat mengubah sifat-sifat kurang menguntungkan dari tanah. Metode stabilisasi ini biasanya digunakan untuk tanah yang berbutir halus. Pencampuran bahan kimia yang sering dilakukan adalah dengan menggunakan semen, kapur, abu batubara, dan sebagainya.

2.8.1 Stabilisasi Tanah dengan Kapur

Metode stabilisasi yang paling sering dilakukan adalah metode stabilisasi mekanis dan kimiawi. Stabilisasi dengan semen cocok untuk tanah yang tidak kohesif, yaitu tanah berpasir dan kerikil yang mengandung sedikit tanah berbutir halus, sedangkan kapur dan *pozzolan* cocok untuk tanah kohesif (Soedarmo dan Purnomo, 1997). Kapur merupakan material yang cukup mudah ditemukan serta memiliki harga yang relatif terjangkau. Apabila kapur dengan mineral lempung atau mineral halus lainnya bereaksi, maka akan membentuk suatu gel yang kuat dan keras, yaitu kalsium silikat yang mengikat butir-butir atau partikel tanah (Ingles dan Metcalf, 1972). Sehingga sifat kimia dari kapur tersebut cukup efektif untuk dijadikan bahan stabilisasi tanah ekspansif. Kapur yang biasa digunakan dalam stabilisasi adalah kapur hidup (*quicklime*, CaO) dan kapur padam (*calcium hydroxide*, Ca(OH)₂) yang merupakan produk pembakaran batu kapur.

Pemilihan bahan kapur sebagai bahan stabilisasi yang cocok untuk tanah lempung ekspansif daripada bahan-bahan stabilisator lain ditentukan berdasarkan ukuran butir tanah yang lolos saringan No. 200 dan Indeks Plastisitas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13

Indeks Plastis	Lolos # No. 200 > 25%			Lolos # No.200 < 25%		
	IP ≤ 10	10 < IP < 20	IP ≥ 20	IP ≤ 6 IP x % P200 ≤ 60	IP ≤ 10	IP > 10
Bahan Stabilisasi						
Semen	[Cocok]			[Tidak Cocok]		
Kapur	[Cocok]			[Tidak Cocok]		
Aspal	[Cocok]			[Tidak Cocok]		
Kombinasi Aspal/semen	[Cocok]			[Tidak Cocok]		
Kimia Lain	[Cocok]			[Tidak Cocok]		
Keterangan	[Cocok]	[Meragukan]	[Tidak Cocok]			

Gambar 2.13 Kriteria Pemilihan Bahan Pengikat
Sumber: AUSTROAD (1998)

Tanah lempung ekspansif memiliki nilai plastisitas yang sangat tinggi dan prosentase butiran tanah lolos saringan no.200 yang sangat tinggi sehingga tergolong cocok distabilisasi dengan menggunakan bahan aditif kapur.

Pada umumnya, penambahan kapur dalam tanah berbutir halus, oleh adanya air menurut Hardiyatmo (2010) akan menyebabkan 2 reaksi yaitu : reaksi pertukaran kation dan flokulasi ; dan reaksi pozzolanik tanah-kapur. Menurut Hardiyatmo (2010), tujuan utama penggunaan kapur untuk stabilisasi tanah adalah kapur untuk memodifikasi sifat-sifat tanah dan kapur ditujukan untuk stabilisasi tanah secara permanen. Pasir tidak akan bereaksi dengan kapur, karena pasir tidak mengandung mineral lempung. Tanah yang terdiri dari campuran pasir dan lempung dapat distabilisasi dengan baik., tergantung pada sifat-sifat pozzolanik mineral lempung dalam campuran pasir dan lempung tersebut.

Adapun kandungan unsur yang terdapat dalam kapur yang digunakan untuk stabilisasi tanah harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

Tabel 2.7 Ketentuan Kapur

Unsur	Kapur	
	Kapur Kembang (CaO)	Kapur Padam Ca(OH) ₂
Magnesium Oksida (MgO) dan Kalsium Oksida (CaO)	> 92%	> 95%
Karbondioksida (CO ₂)	3% - 10%	5% - 7%
Kehalusan Butir	-	< 12% (2 mikron)

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum (2007)

Tabel 2.8 Perbandingan antara Ca(OH)_2 dengan CaO

Jenis Kapur	Keuntungan	Kekurangan
Ca(OH)_2	Tidak memerlukan banyak air	Lebih peka untuk berdebu
CaO	1. Lebih hemat penggunaannya sekitar 30% daripada kapur jenis lain	1. Memerlukan banyak air daripada penggunaan kapur Ca(OH)_2
	2. Kepadatan curah lebih besar	2. Mengeluarkan uap air saat proses slaking
	3. Lebih cepat kering di lahan yang basah	

Sumber : AustStab Technical Note (2008)

Ringkasan umum dari stabilisasi tanah dengan menggunakan kapur (*lime stabilization*) dapat dilihat pada Tabel 2.9

Tabel 2.9 Kelebihan Stabilisasi dengan Kapur Ditinjau dari Tiap-tiap Properties

Properties	Kelebihan
Plasticity	Indeks plastisitas akan berkurang, ini diakibatkan karena pengurangan liquid limit dan peningkatan plastic limit
Mooisture density relationship	Hasil dari reaksi antara kapur dengan tanah adalah perubahan yang substansial pada berat isi. Perubahan berat isi mencerminkan keadaan tanah yang baru dan ini adalah bukti bahwa terjadi perubahan fisik pada tanah selama masa perawatan
Swell potensial	Potensial pengembangan tanah dan pengembangan tekanan akan berkurang selama masa perawatan
Drying	Kapur sangat membantu pengeringan tanah yang basah. Kondisi ini memungkinkan untuk segera melakukan pemadatan.
Strenght Properties	USCS dan CBR tanah yang distabilisasi dengan kapur akan mengalami peningkatan yang sangat besar. Kondisi ini akan semakin meningkat apabila kemudian dikombinasikan dengan semen setelah perawatan kapur
Water resistance	Tanah yang distabilisasi dengan kapur akan menghasilkan lapisan yang kedap air dan menghalangi penetrasi dari kadar air tanah. Sehingga lapisan perkerasan tidak dipengaruhi oleh cuaca

Sumber : AustStab Technical Note (2008)

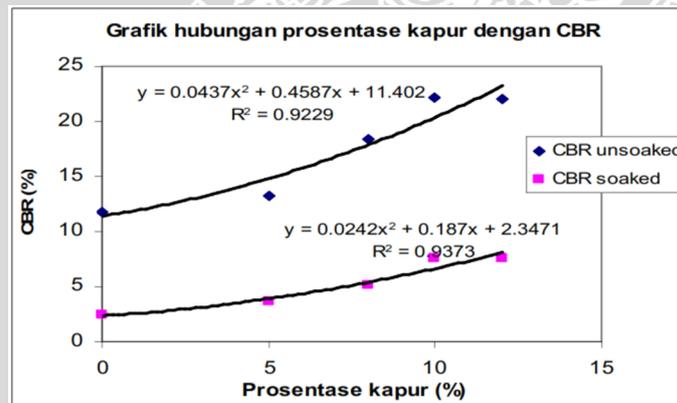
Warsiti (2009) melakukan penelitian dengan melakukan variasi penambahan kapur dengan kadar 0 %, 5%, 8%, 10%, 12% pada tanah ekspansif diSendang Mulyo, Semarang. Dengan adanya penambahan kadar kapur serta waktu perawatan (curing) optimum selama 3 hari dapat meningkatkan nilai CBR. Peningkatan terjadi pada penambahan kadar kapur 10%.

CBR keadaan unsoaked mengalami kenaikan dengan bertambahnya persentase kapur dalam campuran sampai pada persentase 10 %, dari 11,8 % menjadi 22,1 %, tetapi pada persentase kapur 12% CBR turun sedikit menjadi 22,0 %.

CBR keadaan soaked mengalami kenaikan dengan bertambahnya persentase kapur dalam campuran sampai pada persentase 10 %, dari 2,45 % menjadi 7,6 %, tetapi pada persentase kapur 12% CBR turun sedikit menjadi 7,58 %.

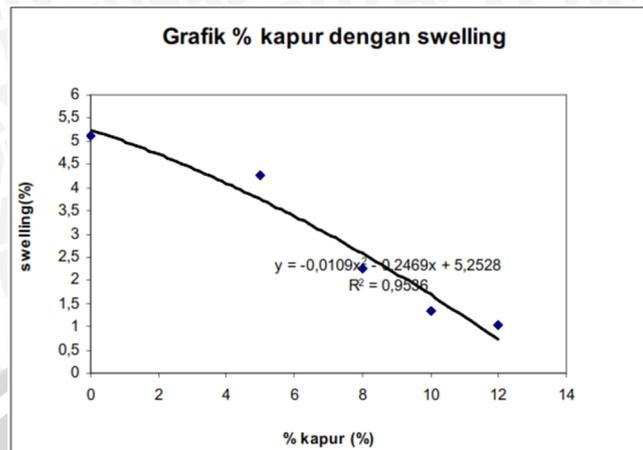
Sementara itu besarnya *swelling* mengalami penurunan dengan bertambahnya persentase kapur dengan kata lain semakin banyak persentase kapur semakin kecil *swelling* yang terjadi.

Grafik hubungan antara nilai CBR dengan variasi penambahan kapur dapat dilihat pada Gambar 2.14 berikut:



Gambar 2.14 Grafik Hubungan Persentase Kapur dengan CBR
Sumber: Warsiti (2009)

Sedangkan grafik hubungan antara *swelling* dengan variasi penambahan kapur dapat dilihat pada Gambar 2.15 berikut:



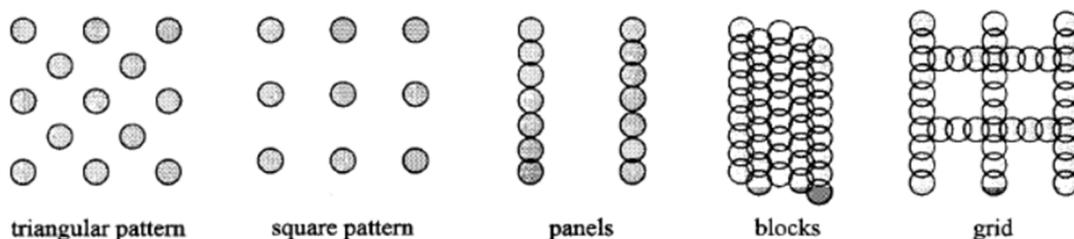
Gambar 2.15 Grafik Hubungan Persentase Kapur dengan *Swelling*
Sumber: Warsiti (2009)

2.8.2 Metode Pencampuran Tanah Dalam (*Deep Soil Mix Method*)

Metode *deep soil mixing* merupakan metode pencampuran dengan bahan aditif pada tanah agar terjadi pengikatan antara bahan aditif dengan tanah hingga kedalaman tertentu untuk meningkatkan stabilitas tanah.

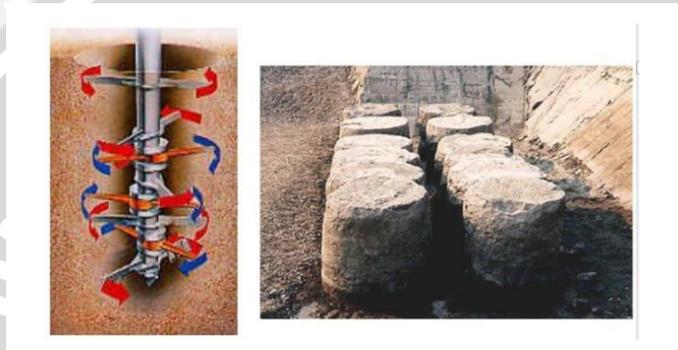
Kosche (2004) mengatakan bahwa metode ini berguna untuk mengurangi penurunan dan/atau meningkatkan stabilitas tanah. Selain itu juga, DSM dapat berperan seperti *vertical drain* dan dapat mempercepat proses penurunan (*settlement*).

Kolom *deep soil mixing* (DSM) dapat diletakkan atau diterapkan dengan konfigurasi yang berbeda-beda, seperti seperti *single column*, *blocks column*, *panels*, dan *grids types* yang ditunjukkan pada Gambar 2.16. Untuk mengurangi penurunan dibawah timbunan digunakan konfigurasi *single column* dengan pola persegi. Sedangkan konfigurasi *panels*, *grids*, atau *blocks* biasanya digunakan untuk bangunan atas dengan dimensi yang besar seperti lereng, galian, dam, dinding penahan tanah, dan di bawah timbunan.



Gambar 2.16 Konfigurasi Kolom DSM
Sumber: Kosche (2004:12)

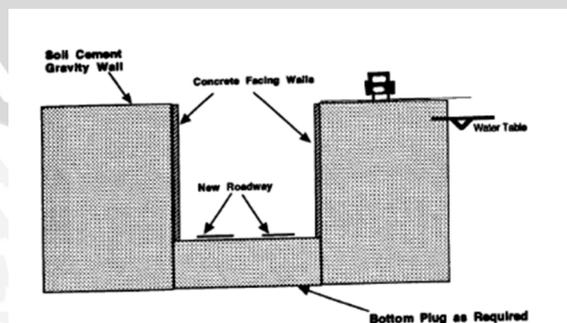
Proses stabilisasi dapat dilakukan dengan cara mekanis *dry mixing*, *wet mixing*, atau *grouting*. *Dry mixing* digunakan untuk lokasi proyek dimana muka air tanah tinggi dan dekat dengan permukaan tanah. Bahan aditif dimasukkan ke dalam tanah dalam bentuk kering. *Wet mixing* digunakan untuk lingkungan yang kering dan gersang atau lokasi dengan muka air tanah yang dalam. Bahan aditif dimasukkan ke dalam tanah dalam bentuk cair (*slurry*) dimana sebelumnya bahan aditif dicampur terlebih dahulu dengan air. *Grouting* dengan atau tanpa jet hidrolis tekanan tinggi telah digunakan untuk memperkuat tanah, membantu proses penggalian, dan mengontrol muka air tanah dalam kegiatan konstruksi. (Annad et al, 2008:27)



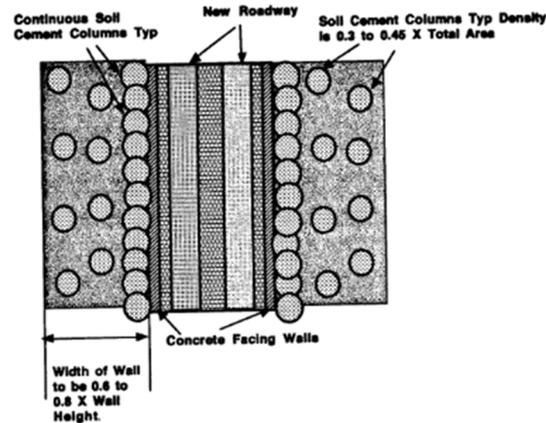
Gambar 2.17 Stabilisasi Kolom DSM di Lapangan
Sumber : Annad et al. (2008:26)

Di dalam pelaksanaannya, metode perbaikan tanah dengan menggunakan DSM erat kaitannya dengan struktur jalan. Jenis konfigurasi kolom yang paling sering digunakan adalah tipe *Triangular* dan *Single Square*. Namun tak jarang digunakan tipe *Panels* untuk suatu kondisi tertentu.

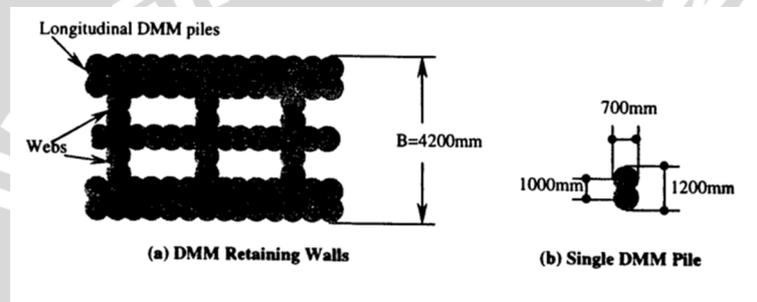
Jenis konfigurasi *Triangular* dan *Single Square* memiliki kelebihan berupa sebaran tegangan yang relatif lebih merata sehingga dapat digunakan di tempat dengan area stabilisasi yang luas. Sedangkan Tipe *Panels* dapat digunakan sebagai dinding penahan tanah.



Gambar 2.18 Potongan Melintang Struktur Jalan dengan Perkuatan DSM
Sumber : US Department of transportation (2000)



Gambar 2.19 Tampak Atas Struktur Jalan dengan Perkuatan DSM
Sumber : US Department of transportation (2000)



Gambar 2.20 DSM untuk Konstruksi Dinding Penahan Tanah
Sumber: Shao et al (1998)

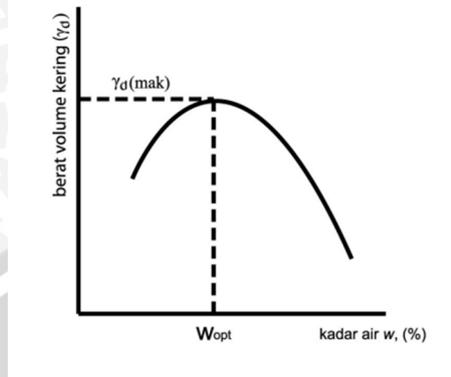
2.9 Uji Pemadatan

Pemadatan merupakan cara untuk meningkatkan kepadatan tanah yaitu dengan mengeluarkan udara pada pori-pori tanah agar jarak antar partikel tanah menjadi semakin rapat. Upaya pemadatan biasanya menggunakan energi mekanis. Di lapangan, usaha pemadatan diterapkan dengan cara menggilas tanah menggunakan mesin. Sedangkan pemadatan di laboratorium menggunakan metode pengujian standar, dengan cara suatu proctor yang dijatuhkan dari ketinggian tertentu dengan berat yang telah ditentukan. Pengujian pemadatan tanah ini akan menghasilkan hubungan antara kadar air dengan berat volume.

Tujuan pemadatan diantaranya adalah untuk memadatkan tanah dalam keadaan kadar air optimum, sehingga udara dalam pori-pori tanah akan dipaksa keluar sampai kondisi dimana butiran tanah berada pada nilai kerapatan yang maksimum.

Uji pemadatan digambarkan dalam kurva hubungan antara kadar air (w) sebagai absis dan berat volume tanah kering sebagai ordinat, puncak kurva sebagai nilai kepadatan

kering (γ_d) maks, kurva yang digunakan adalah kurva dari uji pemadatan tanah (*standard proctor test*). Dari titik puncak γ_d ditarik garis vertikal memotong absis, pada titik ini adalah kadar air optimum seperti yang terlihat pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Kurva Hubungan Kadar Air dengan Berat Volume Kering
Sumber: Das (1994)

Terdapat 2 jenis uji pemadatan, yaitu *standard proctor* dan *modified proctor*. Untuk proses pemadatan di dalam pengujian laboratorium digunakan pemadatan standar (ASTM D-698) dengan pemukulan sebanyak 56 kali per lapis, dan jumlah lapisan sebanyak 3 lapis. Berikut tabel perbandingan kedua metode pemadatan tersebut:

Tabel 2.10 Perbandingan Metode Pemadatan Standar (ASTM D-698, AASHTO T-99) dan Modified (ASTM D-1557, AASHTO T-180)

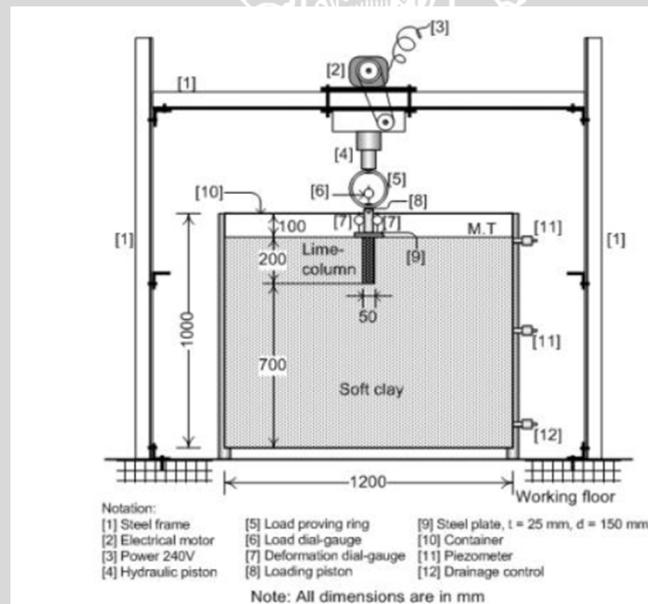
Penjelasan	Satuan	ASTM D-698, ASSTHO T-99				ASTM D-1557, ASSTHO T-180			
		Metode A	Metode B	Metode C	Metode D	Metode A	Metode B	Metode C	Metode D
Cetakan Volume	ft ³	1/30	1/13,33	1/30	1/13,33	1/30	1/13,33	1/30	1/13,33
	cm ³	943,9	2124,3	943,9	2124,3	943,9	2124,3	943,9	2124,3
Tinggi	in	4,58	4,59	4,58	4,59	4,58	4,59	4,58	4,59
	mm	116,33	116,34	116,33	116,34	116,33	116,34	116,33	116,34
Diameter	in	4	6	4	6	4	6	4	6
	mm	101,6	152,4	101,6	152,4	101,6	152,4	101,6	152,4
Berat (massa) penumbuk	lb	5,5	5,5	5,5	5,5	10	10	10	10
	kg	2,5	2,5	2,5	2,5	4,54	4,54	4,54	4,54
Tinggi jatuh penumbuk	in	12	12	12	12	18	18	18	18
	mm	304,8	304,8	304,8	304,8	457,2	457,2	457,2	457,2
Jumlah lapisan tanah		3	3	3	3	5	5	5	5
Jumlah tumbukan tiap lapis		25	56	25	56	25	56	25	56
Fraksi tanah yang diuji lolos ayakan		No. 4	No. 4	3/4 in	3/4 in	No. 4	No. 4	3/4 in	3/4 in

Sumber : Manual Prosedur Mekanika Tanah 2, Laboratorium Mekanika Tanah FTUB

2.10 Uji Pembebanan

Uji pembebanan dilakukan untuk mengetahui atau menyelidiki perilaku dari suatu benda uji. Pada dasarnya metode uji pembebanan harus dilakukan sedemikian rupasehingga pembebanan yang dilakukan setara dengan pembebanan yang ada di lapangan. Namun metode uji pembebanan juga harus disesuaikan dengan kondisi laboratorium, karena tidak semua permasalahan yang ada di lapangan bisa dilakukan di laboratorium. Maka dari itu uji pembebanan sebagian dilakukan dengan melihat secara khusus faktor utama parameter perilaku benda uji yang akan diselidiki.

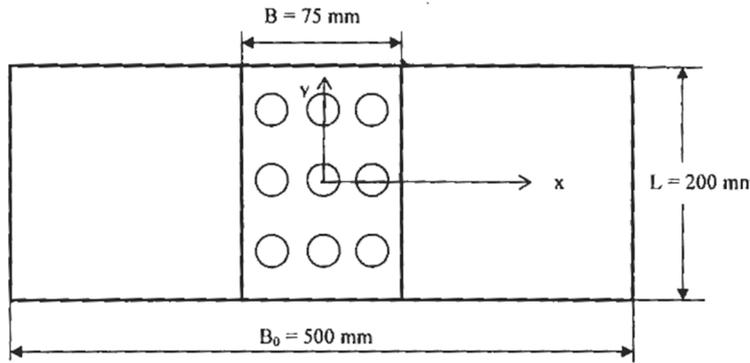
Asumsi penggunaan beban pondasi kaku memberikan kemudahan tersendiri dalam pelaksanaan uji pembebanan di laboratorium. Dalam penelitian terdahulu, (Muntohar, 2009) menggunakan beban pelat pondasi pada simulasi pembebanan untuk studi laboratorium terhadap stabilisasi tanah dengan penggunaan bahan pencampur kapur pada metode kolom kapur. Gambaran penggunaan pondasi pada uji pembebanan ini disajikan pada Gambar 2.22 berikut:



Gambar 2.22 Skema Uji Pembebanan
Sumber: Muntohar (2009)

2.11 Area Stabilisasi Kolom DSM

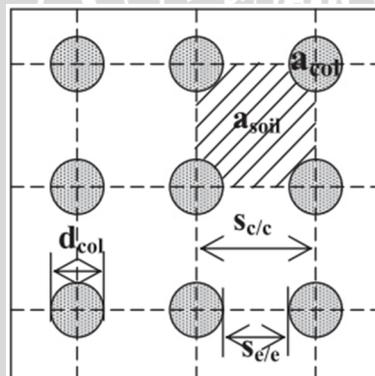
Area stabilisasi kolom DSM di dalam penelitian ini ditentukan dengan menggunakan 2 metode. Metode pertama digunakan untuk mengetahui hubungan kenaikan area stabilisasi dengan kenaikan daya dukung tanah. Seperti pada penelitian yang dilakukan (Bouassida, M & Porbaha, A, 2004) pada tanah lempung lunak dengan skema pembebanan sesuai Gambar 2.23 berikut.



Gambar 2.23 Tampak Atas Skema Pembebanan terhadap Tanah yang Distabilisasi
Sumber: Bouassida, M & Porbaha, A (2004)

Seperti tampak pada gambar, *rigid plate* dengan panjang 200 mm dan 75 mm diletakkan diatas tanah model tepat di garis tengah tanah. Persentase tanah yang distabilisasi dihitung pada area tanah yang menerima uji beban atau seluas *rigid plate*, yaitu $75 \times 200 \text{ mm}^2$ dengan kedalaman tanah di dalam box 190 mm.

Metode kedua dalam menghitung area stabilisasi digunakan untuk mengetahui hubungan kenaikan area stabilisasi dengan nilai potensi pengembangan (*swelling*). Madhyannapu dan Puppala (2014) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa area stabilisasi adalah luasan kolom stabilisasi dibagi dengan luasan persegi yang dibentuk dari as kolom seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.24 berikut.



Gambar 2.24 Susunan Kolom Tipe *Square*
Sumber : Madhyannapu dan Puppala (2014)

Dari Gambar di atas, area stabilisasi dapat dihitung dengan rumus pada persamaan sebagai berikut:

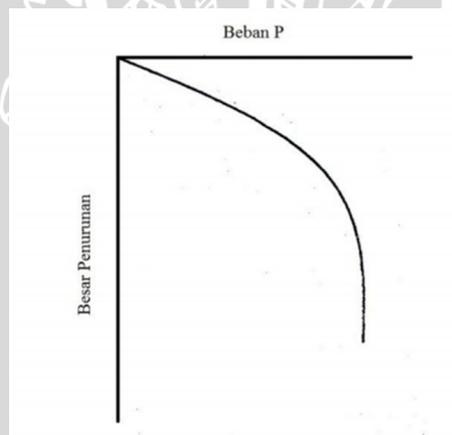
$$a_r = \frac{a_{col}}{a_{soil} + a_{col}} \quad (2-3)$$

atau

$$a_r = \frac{\left(\frac{fd^2_{col}}{4} \right)}{s_{c/c} \times xs_{c/c}} \quad (2-4)$$

2.12 Daya Dukung Tanah

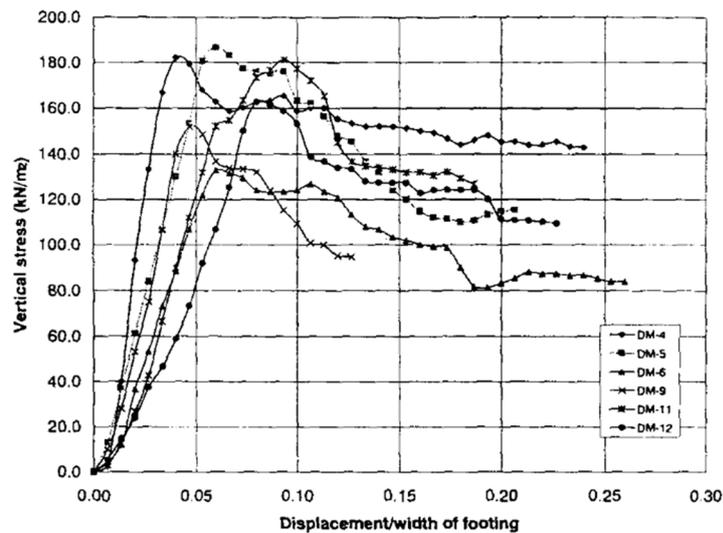
Daya dukung tanah didefinisikan sebagai kekuatan maksimum tanah menahan tekanan dengan baik tanpa menyebabkan terjadinya failure. Sedangkan *failure* pada tanah adalah penurunan (*settlement*) yang berlebihan atau ketidakmampuan tanah melawan gaya geser dan untuk meneruskan beban pada tanah. (Bowles, 1989)



Gambar 2.25 Daya Dukung Batas Dari Tanah Pondasi
Sumber : Bowles (1989)

Gambar diatas menunjukkan bahwa apabila beban bekerja pada tanah pondasi dinaikkan maka penurunan akan meningkat dengan cepat setelah gaya telah mencapai gaya tertentu dan kemudian penurunan akan terus berlanjut, meskipun beban tidak ditambah lagi.

Bouassida & Porbaha (2004) melakukan penelitian terhadap tanah lempung lunak dengan melakukan variasi pemodelan kolom-kolom dengan metode *Deep Soil Mix* dan melakukan uji pembebanan dengan pelat baja. Hasil dari pengujian diperoleh hubungan antara tegangan vertikal (q) dengan perbandingan antara penurunan dengan lebar pondasi.



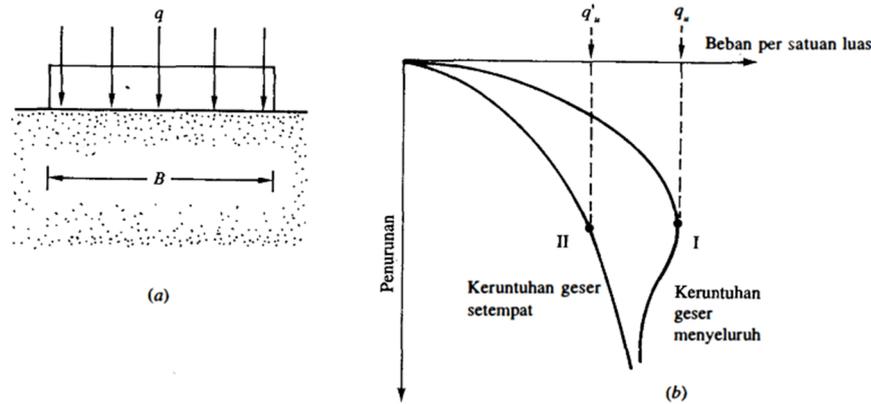
Gambar 2.26 Grafik Hubungan Tegangan Vertikal Terhadap Rasio Antara Penurunan dan Lebar Pelat Beban.

Sumber : Bouassida & Porbaha (2004)

2.13 Daya Dukung Tanah Tanah untuk Pondasi Dangkal

Dalam perencanaan pondasi harus memperhitungkan adanya keruntuhan geser dan penurunan yang berlebihan. Untuk itu perlu dipenuhi kriteria stabilitas dan kriteria penurunan. Di samping itu untuk memenuhi stabilitas jangka panjang, pondasi harus bertumpu pada perletakan yang stabil yakni pada kedalaman yang cukup untuk menanggulangi bahaya erosi/gerusan, kembang susut tanah, dan sebagainya. Secara umum, yang dinamakan pondasi dangkal adalah pondasi yang mempunyai perbandingan antara kedalaman dengan lebar sekitar kurang dari empat.

Apabila beban terbagi rata q per satuan luas diletakkan di atas model pondasi, maka pondasi tadi akan turun. Apabila beban terbagi rata (q) tersebut ditambah, tentu saja penurunan pondasi yang bersangkutan akan bertambah pula. Tetapi, bila besar $q = q_u$ (Gambar 2.27b) telah dicapai, maka keruntuhan daya dukung akan terjadi, yang berarti pondasi akan mengalami penurunan yang sangat besar tanpa penambahan beban q lebih lanjut. Tanah di sebelah kanan dan kiri pondasi akan menyembul dan bidang longsor akan mencapai permukaan tanah. Hubungan antara beban dan penurunan akan seperti Kurva I yang ditunjukkan dalam Gambar 2.27b. Untuk keadaan ini, kita mendefinisikan q_u sebagai daya dukung batas dari tanah.



Gambar 2.27 Daya dukung batas tanah untuk kondisi dangkal; (a) Model pondasi; (b) Grafik hubungan antara beban dengan penurunan.
 Sumber : Das (1995)

Daya dukung batas (*ultimate bearing capacity*) = q_u didefinisikan sebagai beban maksimum per satuan luas dimana tanah masih dapat memikul beban tanpa mengalami keruntuhan. Bila dinyatakan dalam persamaan:

$$q_u = P_u/A \quad (2-5)$$

dimana : q_u = daya dukung batas

P_u = beban batas

A = luas pondasi

Persamaan daya dukung batas menurut Terzaghi dapat ditulis sebagai berikut:

$$q_u = c.N_c + q.N_q + \frac{1}{2} \cdot B.N$$

dimana : c = kohesi tanah dasar pondasi

B = lebar pondasi

q = surcharge = σ

D = kedalaman pondasi

$$N_c = tg \cdot (Kc + 1)$$

$$N_q = tg \cdot Kq$$

$$N = \frac{1}{2} \cdot tg \cdot (K \cdot tg - 1)$$

Menurut Bowles (1986), daya dukung tanah untuk pondasi dangkal bergantung dari kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ). Apabila kadar air tanah (w) meningkat maka nilai kohesi tanah (c) dan sudut geser dalam (ϕ) akan menurun. Dengan demikian kekuatan tanah juga akan menurun. Nilai kohesi dan sudut geser dalam akan meningkat apabila dalam kondisi kering atau kondisi kadar air tanah tidak berpengaruh pada pondasi.



Hubungan kuat geser dengan variasi kadar air dan persentase stabilisasi telah dijelaskan Firdaus (2016) kadar air pada tanah lempung ekspansif dengan campuran 10% kapur berpengaruh terhadap kuat geser tanah. Semakin kecil kadar air grafik tegangan-regangan tanah akan semakin kaku dan kohesi (c_u) semakin besar. Sedangkan semakin besar rasio volume stabilisasi, nilai kohesi akan semakin besar apabila dibandingkan dengan tanah kondisi asli.

2.14 Kembang Susut Tanah

Pengembangan (*swell*) adalah bertambahnya elevasi atau dilasi (*dilation*: pembesaran ke semua arah) dari suatu kolom tanah akibat penyerapan air. Pengembangan bebas yaitu persentase pengangkatan akibat penyerapan air pada tekanan penyeimbang se . Tekanan penyeimbang atau *seating pressure* merupakan besarnya tekanan atau beban yang diberikan agar sistem yang menekan pada permukaan benda uji betul-betul duduk pada tempatnya. Biasanya beban yang diberikan sebesar 1-2 kPa. (SNI 6424:2008)

Persentase pengembangan menurut SNI 6424:2008 dihitung dengan rumus pada persamaan sebagai berikut:

$$SP = \frac{\Delta h}{h} \times 100 = \frac{e_{vo} - e_0}{1 + e_0} \times 100 \quad (2-5)$$

Dengan :

h adalah perubahan tinggi contoh uji.

h_0 adalah tinggi awal contoh uji.

e_{sc} adalah angka pori setelah terjadi pengembangan pada tekanan penyeimbang.

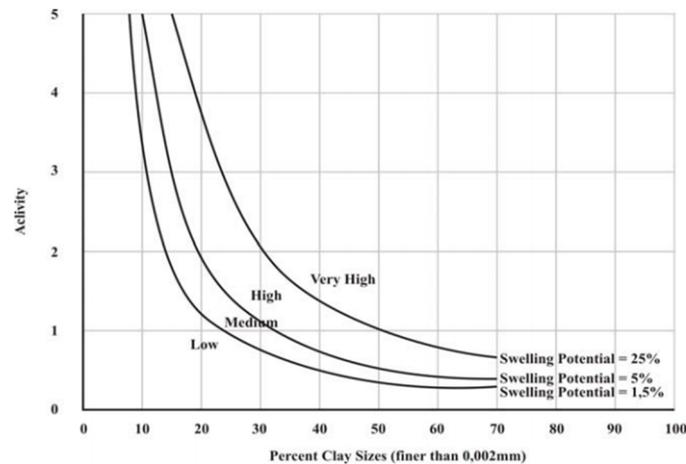
e_0 adalah angka pori awal

Seed et al (1962) membuat hubungan antara potensi pengembangan dengan derajat pengembangan sebagaimana terlihat pada Tabel 2.11 berikut:

Tabel 2.11 Klasifikasi Derajat Ekspansif

Swelling Potential (%)	Swelling Degree
0 – 1,5	Low
1,5 – 5	Medium
5 – 25	High
> 25	Very High

Sumber: Seed et al (1962)



Gambar 2.28 Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang
Sumber: Seed et al(1962)

Sebagaimana Gambar 2.28 diatas, Seed et al (1962) mengembangkan grafik hubungan nilai aktifitas dan persentase butir tanah lempung yang lolos saringan 0,002mm yang diperoleh dari hasil pengamatan sejumlah tanah lempung *remolded* dengan mineral yang berbeda-beda, yaitu: *Bentonite*, *Illite*, *Kaolinit* dan pasir halus dimana contoh tanah-tanah tersebut dipadatkan 100% pada kadar air optimumnya dan menerima beban 1 psi.

Uji potensi pengembangan dalam penelitian ini mengacu pada penelitian Madhyannapu dan Puppala (2014) yang menyatakan bahwa toleransi pengembangan yang direkomendasikan adalah sebesar 12 mm (0,5 inch) untuk struktur *flexible pavement* dan 18 mm (0,7 inch) untuk struktur *rigid pavement*.

